

文章编号: 1003-1480(2022)06-0029-04

钢纤维增强型Ti-Al爆炸焊接结合界面研究

郭传祥¹, 刘迎彬¹, 陈瑶¹, 胡晓艳¹, 陈燕², 鲁飞³

(1. 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051; 2. 陆军装备部驻北京军事代表局驻太原地区第一军事代表室, 山西 太原, 030009; 3. 陆军装备部装备项目管理中心, 北京, 100071)

摘要: 为探究钢纤维增强型 Ti-Al 爆炸焊接参数对结合界面微观形貌的影响, 采用光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法模拟了爆炸焊接过程, 分析了装药高度和板间距对结合界面波纹大小的影响。根据模拟结果进行了爆炸焊接试验, 并通过金相分析对焊接质量进行了验证。模拟结果表明, 提高装药高度可增大结合界面处波纹的波高与波长, 从而提高焊接质量; 减小板间距可减小波纹的波高与波长以避免过熔; 最佳装药高度和板间距分别为 12mm 和 1.0mm。金相分析表明, 钢纤维与铝板和钛板结合紧密, 结合界面有明显的小波纹存在, 且界面光滑、无明显缺陷。

关键词: 爆炸焊接; 纤维复合; 数值模拟; 结合界面

中图分类号: TJ45+9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.06.006

Study on Bonding Interface of Steel Fiber Reinforced Ti-Al Explosive Welding

GUO Chuan-xiang¹, LIU Ying-bin¹, CHEN Yao¹, HU Xiao-yan¹, CHEN Yan², LU Fei³

(1. Department of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051; 2. The First Military Representative Office in Taiyuan, Military Representative Bureau of the Army Equipment Department in Beijing, Taiyuan, 030009; 3. Equipment Project Management Center of Army Equipment Department, Beijing, 100071)

Abstract: In order to investigate the effect of steel fiber reinforced Ti-Al explosive welding parameters on the micro-structure of bonding interface, smooth particle hydrodynamics (SPH) method was used to simulate the explosive welding process, and the effects of charge height and plate spacing on the ripple size of bonding interface were analyzed. According to the simulation results, the explosion welding test was carried out, and the welding quality was verified by metallographic analysis. The simulation results show that increasing the charge height can increase the wave height and wave length of the ripple at the bonding interface, thus improving the welding quality; Reducing the plate spacing can reduce the wave height and wave length of the ripple to avoid over melting; The optimum charge height and plate spacing are 12mm and 1.0mm respectively. Metallographic analysis shows that the steel fiber is closely combined with Al plate and Ti plate, and there are obvious small ripples at the bonding interface, and the interface is smooth without obvious defects.

Key words: Explosive welding; Fiber composite; Numerical simulation; Bonding interface

爆炸焊接基于爆炸驱动技术, 通过碰撞点处高温高压的剧烈变形实现不同板材的结合^[1-3]。爆炸焊接加工的钛铝复合板已广泛应用于航空航天、造船、高压化工容器、核工业和石化工业等领域^[4-5]。随着工业发

展, 传统的钛铝叠层复合板的结合强度及力学性能已无法满足要求。因此, 许多学者对金属爆炸纤维增强复合材料进行了研究^[6]。这种材料抗拉强度高、结合强度高、比强度和比刚度高、冲击韧性高、工作温度

收稿日期: 2022-03-24

作者简介: 郭传祥 (1997-), 男, 在读硕士研究生, 从事爆炸焊接技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (No. 12002319, 11802274); 山西省高校科技创新项目 (2020L0273, 2020L0312)。

高、成型性能好、坚硬、耐腐蚀和稳定性好,且能在很大范围内控制其导热、导磁、导电和其它性能^[7-8]。周楠等^[9]研究发现爆炸焊接靶板中加入钢纤维可以提高靶板的抗侵彻性能。G. H. S. F. L. Carvalho 等^[9]研究表明爆炸焊接的铝纤维-钢基体复合材料在温度降至-70°C时,在脆性破断的过程中仍能保持高强度。C. Borchers 等^[1]指出爆炸焊接结合界面的波状形态对复合材料性能有重要影响。但目前针对钢纤维增强型钛铝复合板结合界面的研究还相当匮乏。

本文采用光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法模拟了钢纤维增强型钛铝复合板爆炸焊接中复板、夹板、基板及钢纤维之间的碰撞过程,分析了装药量和板间距对其结合界面的影响,并通过试验和金相分析对仿真结果进行了验证,为爆炸焊接参数设计提供指导。

1 计算模型与材料参数

1.1 计算模型的建立

采用 AUTODYN 软件中的 SPH 方法建模。SPH 算法是一种无网格算法,该方法将连续的流体或固体用相互作用的质点描述,通过求解每个质点的动力学方程和跟踪其运动轨迹而获得整个系统的力学行为。该算法在处理变形量大和高速运动问题的过程中可避免网格重分及算法耦合,因此适用于多层金属板之间的爆炸焊接数值模拟^[6,10]。建立的钢纤维增强型钛铝复合板模型如图 1 所示。

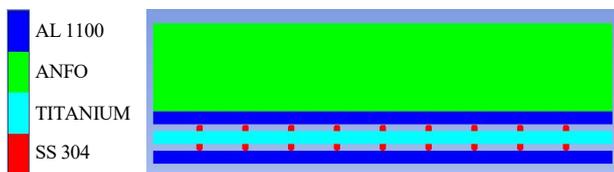


图 1 钢纤维复合 Ti-Al 爆炸焊接模型

Fig.1 Steel fiber composite Ti-Al explosive welding model

钢纤维增强型钛铝复合板的复板和基板为铝板,材料为 1060 铝;夹板为钛板,材料为 Ta1 纯钛。模拟中复板、夹板和基板尺寸与试验一致,均为 300mm×200mm×0.5mm,由于其厚度远小于长度和宽度,爆炸焊接过程可被视为二维问题^[8]。采用平行法进行模拟,复板、夹板和基板间存在一定板间距,两板间均匀布置了直径为 0.25mm 的钢纤维,材料为 SS304。

所有板材和钢纤维的粒子直径均为 0.005mm。炸药为岩石铵油炸药 (ANFO)。通过在基板的下边界上施加边界条件来固定基板。

1.2 材料参数的选择

钛、铝、钢纤维模型材料参数如表 1 所示。

表 1 钛、铝、钢纤维模型材料参数

材料	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	比热容 $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	体积声速 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	熔点 /K	屈服强度 /MPa	导热系数 $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Ta1 纯钛	4.53	520	5 990	1 668	200	15.24
1060 铝	2.71	940	6 300	933	345	237.00
SS304	7.90	490	5 920	1 699	530	21.00

ANFO 采用 JWL 方程描述:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} e^{-R_1 v} \right) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} e^{-R_2 v} \right) + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式 (1) 中: p 为压力; V 为相对体积; E_0 为初始动能; ω 、 R_1 、 R_2 、 A 、 B 为材料常数。ANFO 的 JWL 方程模型参数见表 2。

表 2 ANFO 炸药 JWL 方程参数

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0 / (\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3})$
49.46	1.89	3.91	1.12	0.33	2.70

2 模拟结果与分析

通过对钢纤维增强型钛铝爆炸焊接过程进行模拟,研究装药量及板间距对结合界面微观形貌的影响,共设置了 6 组模拟参数,如表 3 所示。爆炸焊接过程模拟图如图 2 所示。

表 3 爆炸焊接过程模拟参数

编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
装药高度/mm	8	12	16	8	12	16
板间距/mm	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0

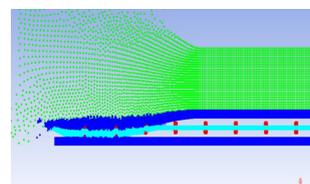


图 2 钢纤维复合爆炸焊接过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of steel fiber composite explosive welding process

由图 2 可知,爆炸焊接过程有明显的小波状界面及射流产生。爆炸焊接时,板材之间猛烈碰撞,产生的高压超过材料静强度十倍以上时,板材进入塑性流动状态,产生射流清理板面,同时也有助于波状界面的形成,因此射流的产生是不可或缺的。模拟结果表明,焊接过程中产生的射流绝大多数为铝粒子,基本

无钛、钢粒子射出，这是因为 1060 铝硬度小于 Ta1 纯钛硬度，更易于达到塑性流动状态从而产生射流。

各组爆炸数值模拟结果如图 3 所示。

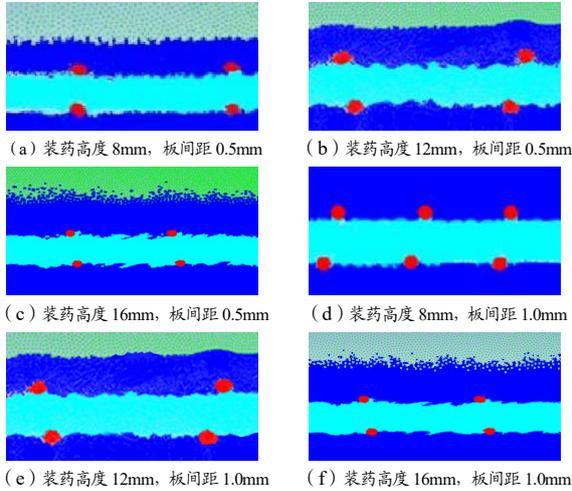


图 3 爆炸焊接数值模拟结果

Fig.3 Numerical simulation results of explosive welding

由图 3 可知，当板间距相同时，随着炸药量增大，结合界面处波纹的波高与波长逐渐增大，直到发生过熔现象。这是因为装药量越大，靠近炸药一侧的复板具有的初始动能就越大，复板的初始速度越大，撞击夹板就更易形成波形界面。当装药量相同时，随着板间距的减小，结合界面波纹的波高与波长减小直至消失。这是因为板间距代表着板材受到炸药爆炸冲击作用下的加速距离。板间距越小，复板的加速距离就越小，板材之间的碰撞速度越小，所形成的波纹也随之减小，当碰撞速度过低时则各板之间无法成功复合。此外，钢纤维所在处（图 3 中红色部分）随着装药高度或板间距的增加，无明显差异，形变量较小。

爆炸焊接结合界面波状大小是影响焊接质量的重要因素，当爆炸焊接结合界面存在小波状时，认为焊接质量良好。由图 3(e)可知，当装药高度为 12mm、板间距为 1.0mm 时，爆炸焊接结合界面处有波纹存在，且板与板、板与纤维之间结合状况良好，整体较为完整，因此选取该组参数进行爆炸焊接试验。

3 爆炸焊接试验与结果分析

3.1 纤维复合板的制备

采用平行法进行爆炸焊接试验，如图 4 所示。试

验前对钛板及铝板进行处理，通过打磨、抛光，以及酒精清洗来清理板材表面污垢及氧化铝，同时将钢纤维每间隔 5mm 布置在钛板上。将钛板和铝板按照图 4 所示的方式置于地基之上，各板间放入 1mm 橡胶垫片确保板间距合理。为保护铝板，在其与炸药接触的部分均匀涂抹黄油，防止板面被灼烧。通过雷管点燃炸药进行爆炸焊接，制备钢纤维增强型钛铝复合板。

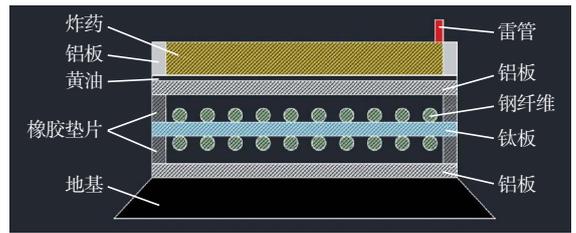


图 4 平行法爆炸焊接试验示意图

Fig.4 Schematic diagram of parallel explosion welding test

3.2 试验结果

爆炸焊接后，对复合板样品切割取样，并用金相砂纸打磨后，通过电子显微镜观察其结合界面，电镜照片如图 5 所示。

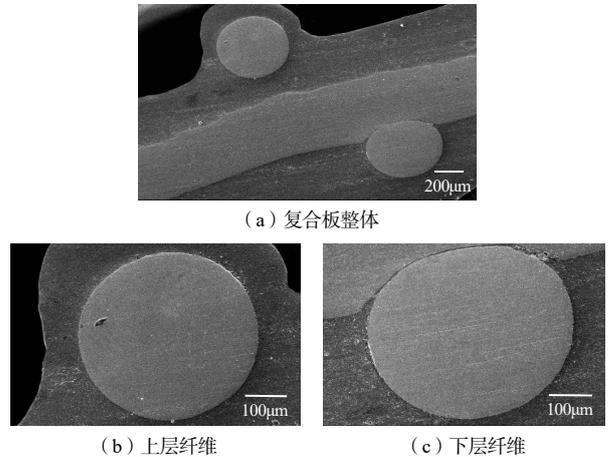


图 5 复合板样品电子显微镜照片

Fig.5 Electron microscope photograph of composite plate sample

图 5 (a) 从上至下依次为铝层、钛层、铝层，最上层铝层接触炸药。由图 5 (a) 可知，钢纤维与铝板和钛板结合紧密，基板、夹板和复板结合面有明显的小波纹存在，结合界面紧密且光滑，无孔洞、断裂等明显缺陷。这是由于在爆炸产生的高温高压作用下，各板材间高速碰撞，产生了剪切变形，同时在碰撞点的前后发生了凸起。在铝金属射流冲刷下，板面形成了具有小波状的结合界面。靠近炸药的一侧，因具有

更大的能量及速度, 波纹的波长与波高也更大, 波长约为 $200\mu\text{m}$, 波高约为 $30\mu\text{m}$, 而远离炸药的一侧波纹较小, 也较平缓。由图 5 (b) 可知, 上层纤维与钛夹板有接触或无接触, 但都包裹在铝层内。这是因为爆炸焊接时, 靠近炸药的铝复板猛烈撞击钛夹板, 产生巨大的压力。结合界面处压力示意图见图 6。

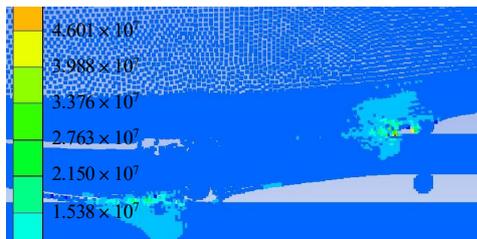


图 6 结合界面处压力示意图

Fig.6 Schematic diagram of pressure at bonding interface

由图 6 可知, 最大压力可达 2.7×10^4 MPa, 远超 Ta1 钛和 1060 铝的屈服强度十倍, 使材料变为塑性流动状态, 而碰撞时产生的大量铝粒子射流冲刷板面, 将钢纤维包裹在内。

由图 5 (c) 可知, 下层纤维部分压进入钛层, 但大部分仍处于铝层内。这是因为基板材料 1060 铝的硬度较夹板材料 Ta1 纯钛低。在爆炸焊接过程中, 夹板与基板的碰撞速度较复板与夹板的碰撞速度更低, 产生的压力较小, 只有少量射流产生, 钢纤维被两板挤压, 而基板较软, 所以大部分被压入基板中。

4 结论

(1) 爆炸焊接过程中形成了铝粒子射流, 当板间距固定时, 适当提高装药量可以明显增大板材间的碰撞速度, 使结合面呈现波状, 提高结合质量; 当装药高度固定时, 在一定范围内减小板间距, 可以有效地降低板材碰撞速度, 以防过熔现象发生。

(2) 钢纤维对爆炸焊接结合界面无明显影响, 纤维与各板材结合良好, 靠近炸药的一侧板材由于具有较大的能量和速度, 形成的射流会将纤维包裹在内; 远离炸药的一侧板材结合界面波纹较小, 纤维处于被压实的状态, 位置视板材硬度而定。

(3) 板材间结合界面有明显的波状界面形成, 结合界面紧密且光滑, 无明显缺陷。当基板、夹板与复板各板间距取 1.0mm, 装药高度取 12mm 时焊接效果良好, 试验结果与模拟结果具有良好的一致性。

参考文献:

- [1] C. Borchers, M. Lenz, M. Deutges. Microstructure and mechanical properties of medium-carbon steel bonded on low-carbon steel by explosive welding[J]. Materials and Design, 2016, 89(Jan.): 369-376.
- [2] Qiang Zhou, Rui Liu, Pengwan Chen. Microstructure characterization and tensile shear failure mechanism of the bonding interface of explosively welded titanium-steel composite[J]. Materials Science and Engineering:A, 2021(820): 141-559.
- [3] 周楠, 王金相, 董刚, 等. 功能梯度复合靶冲击毁伤研究进展[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(12): 2752-2761.
- [4] 刘鲜鲜. Ni/Al 爆炸焊接分子动力学模拟及试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [5] 刘迎彬, 尹楚藩, 安文同, 等. 钛/铝多层复合板爆炸焊接研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(11): 128-131, 136.
- [6] Marco Pasetto, Jonghyuk Baek, Jiun-Shyan Chen. A Lagrangian/semi-Lagrangian coupling approach for accelerated meshfree modelling of extreme deformation problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021(381): 113-827.
- [7] 马雷鸣. 基于 SPH 法的爆炸焊接质量模拟研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- [8] 缪广红, 艾九英, 胡昱, 等. 基于 SPH 法的爆炸焊接边界效应二维数值模拟[J]. 焊接学报, 2021, 42(9): 61-66, 100-101.
- [9] G.H.S.F.L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes. Explosive welding of aluminium to stainless steel using carbon steel and niobium interlayers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020(283): 116-707.
- [10] 马雷鸣. 基于 SPH 法的爆炸焊接质量模拟研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.